ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE ARMADURAS TRIDIMENSIONALES ABOVEDADAS

Roberto Arroyo Matus[1], **Israel Rangel Fernández**[2]

RESUMEN

Este trabajo describen los resultados de un proyecto destinado a evaluar el comportamiento estructural bajo cargas estáticas y dinámicas de cubiertas a base de armaduras tridimensionales abovedadas. Seis propuestas de armaduras tridimensionales tipo bóveda con alturas diferentes son estudiadas para definir la configuración geométrica más adecuada del soporte estructural de una cubierta de gran claro, destinada a un edificio público. Así mismo, es explicada a detalle la metodología para la elaboración de los modelos así como el análisis estático y dinámico modal espectral de este tipo de armadura a través de programas comunes de análisis en los que normalmente esta compleja forma estructural no es incluida en plantillas preelaboradas ni en librerías.

ABSTRACT

This paper presents a general description of a research program performed at the Structural Engineering Research Unit of the Mexican Guerrero University. This numeric study aims to know the structural behavior under static and dynamic loading of three-dimensional arched trusses employed to cover up wide surfaces in long spanned public buildings. In order to select the best of the geometrical truss configurations, several kinds of 3D arched trusses –with different heights- are studied. In addition, a detailed global procedure to elaborate such kind of complex models -that are not included in common structural analysis software's templates- is described. Additionally, the steps involved for both, static and dynamic analyses are also explained.

INTRODUCCIÓN

Hasta entrado el siglo XX, los materiales empleados para la construcción de domos no eran muy diversos; el empleo del concreto simple y la mampostería era muy común y con estos materiales no se podían diseñar cubiertas de gran claro. A partir de 1930 y hasta nuestros días se ha producido no sólo una diversificación de los materiales, sino también de elementos estructurales y de mecanismos de transmisión de esfuerzos. Con esta diversificación y con el empleo de las armaduras tridimensionales, los claros cubiertos han llegado a ser en la actualidad hasta diez veces más grandes que los logrados hasta los primeros años del siglo XX.

Las armaduras tridimensionales son estructuras espaciales formadas por un reticulado de perfiles tubulares metálicos, generalmente tubos redondos, cuadrados o secciones rectangulares donde los elementos conforman cuerdas y diagonales que se conectan a través de pernos o tornillos a nodos conectores de forma esférica o poliédrica con perforaciones roscadas. Dicha conexión se establece tanto en una malla superior como inferior, organizando así nodos multidireccionales que transmiten los esfuerzos a todas las barras. Las tres dimensiones se generan en el nodo conector y se le llama estructura tridimensional por la dirección que todos los elementos guardan en relación con un sistema de ejes. A los perfiles pueden dársele acabados apropiados para evitar problemas de corrosión (recubrimientos de zinc o cadmio, pintura de poliéster, pintura polimerizada al

[1] Profesor-investigador, Unidad Académica de Ingeniería, UAG. Ciudad Universitaria, Chilpancingo, Guerrero, CP 39022, Teléfono y Fax: (747)47-120-87; arroyomatus@hotmail.com

[2] Tesista, Unidad Académica de Ingeniería, UAG. Ciudad Universitaria, Chilpancingo, Guerrero, CP 39022, Teléfono y Fax: (747)47-120-87; hisrael@hotmail.com

horno, pintura electrostática o natural), según lo exijan las condiciones de humedad y salinidad del sitio. Dichos tratamientos también deben ser aplicados a los nodos de unión y a todos los componentes metálicos.

Las estructuras tridimensionales o espaciales permiten conformar pirámides, tetraedros y otras figuras de repetibilidad geométrica, permitiendo una distribución amplia de cualquier carga concentrada a través de toda la estructura y producir formas arquitectónicas estéticamente atractivas y caprichosas que facilitan una múltiple variedad de arreglos y patrones de organización, flexibilidad y posibilidad de crecimiento. Pueden crearse muros, paraguas, pirámides, esferas, casquetes esféricos, formas planas, formas inclinadas, etc. Las posibilidades de aplicación de dicho sistema son muy amplias. Sus usos más comunes se realizan en cubiertas para hangares, canchas, estaciones de servicio, exposiciones, centros comerciales, parasoles, garajes, terrazas, estacionamientos, balcones, etc.

Las ventajas que presentas las estructuras tridimensionales para cubiertas son principalmente: Soluciones a grandes claros, soluciones geométricas complejas, gran nivel de estándares en formas, ligereza y rapidez en el montaje, eficiencia estructural, resistencia sísmica, economía y durabilidad. El empleo de este tipo de estructura en México y en el extranjero cada vez toma mayor auge por su flexibilidad de usos, su respuesta a las nuevas necesidades del mercado de la construcción público y privado, además de ser totalmente prefabricable. Su peso estructural es bajo, ya que es en promedio de 3.5 Kg/m^2 en aluminio y de 10 a 15 Kg/m^2 en acero, lo que da mayores beneficios en el bajo costo del transporte, fácil almacenamiento, ensamblaje y montaje.

El proceso de montaje más extendido, es el de armar rápidamente la estructura en el suelo para luego izarla y posicionarla con grúa. Existen grúas de gran potencia que pueden izar superficies superiores a los 3000 m^2, todo dependerá de la potencia de la grúa y en ocasiones, de la accesibilidad a la obra. Durante el izado debe tenerse especial cuidado con los esfuerzos provocados en la estructura por las fuerzas dinámicas y por el enganchamiento. Estos aspectos deben tomarse en cuenta también en el diseño.

La figura 1 muestra los arreglos comunes para una estructura a base de armadura tridimensional plana, de empleo muy extendido en todo el país. En la figura 2 se muestran los arreglos tridimensionales curvos o abovedados que poco a poco se están introduciendo sobre todo en espacios comerciales, pero que siguen siendo aún raros.

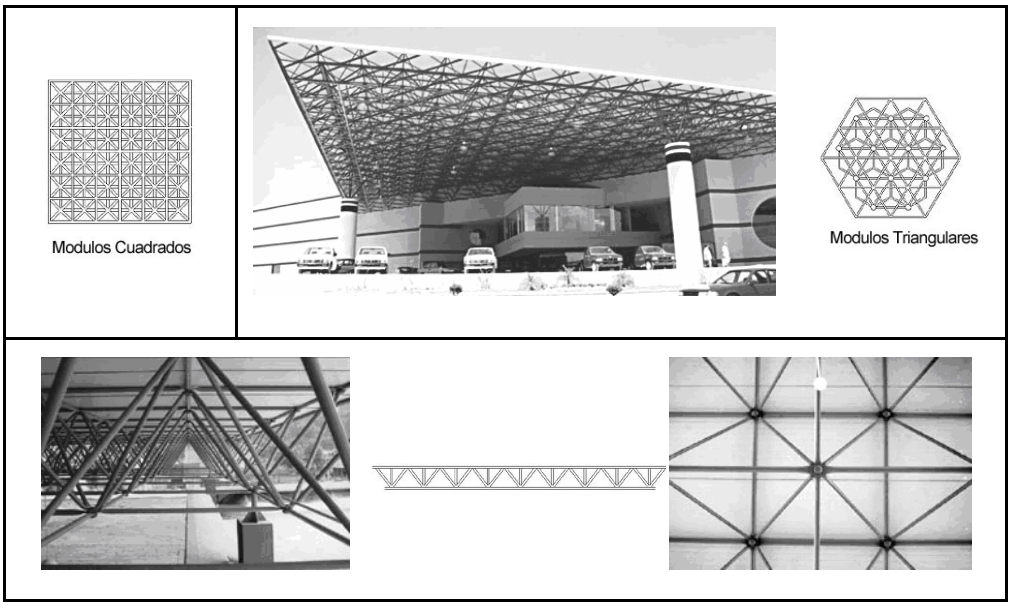


Figura 1 Arreglos comunes de estructura tridimensional plana

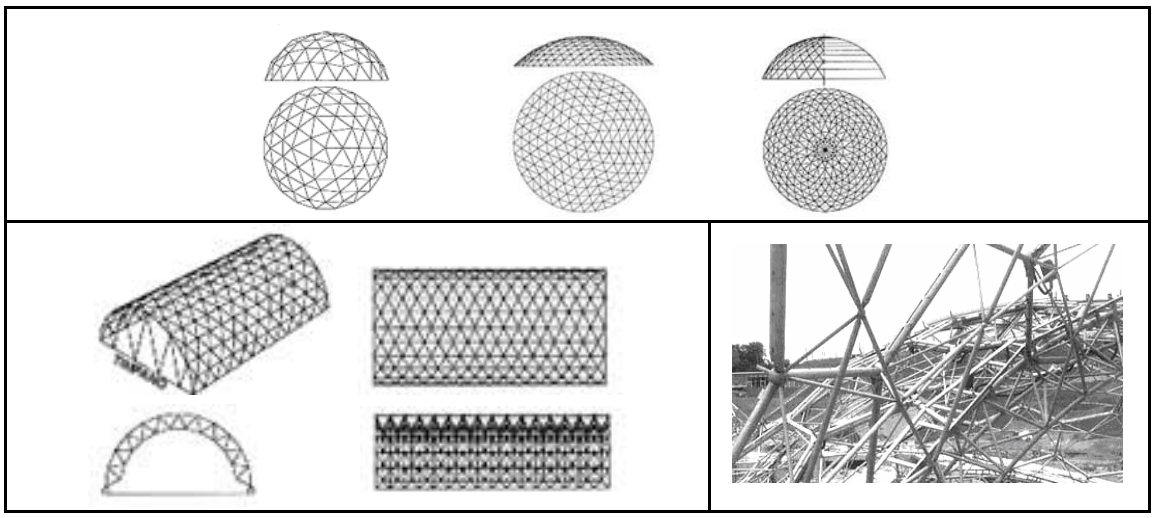


Figura 2 Arreglos especiales de estructura tridimensional abovedada

El análisis y diseño de armaduras espaciales planas por medio de programas de cómputo ha acelerado su empleo a nivel mundial ya que dichos programas poseen librerías para generar automáticamente estructuras complejas y diversas. Sin embargo, la mayoría de los programas no posee algoritmos o plantillas preelaboradas para generar armaduras tridimensionales curvas. La complejidad para modelar manualmente este tipo de armaduras –aunado a la complejidad que envuelve su proceso constructivo- han limitado el desarrollo de estructuras como las que se muestran en las figura 3, espectaculares armaduras con las que se pueden cubrir enormes claros de forma, estética, funcional y segura.

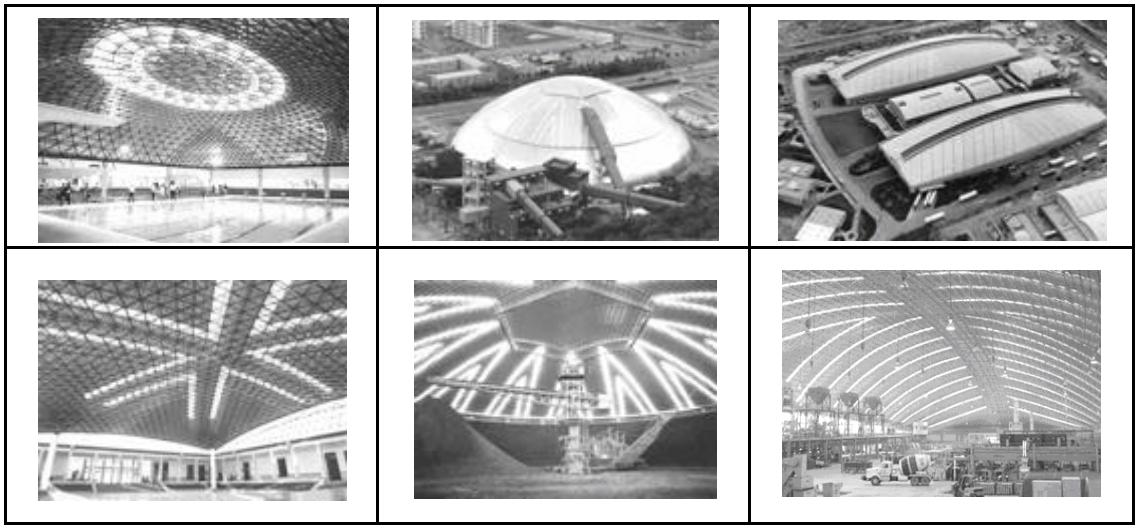


Figura 3 Arreglos en estructura tridimensional curva

La geometría de las estructuras espaciales puede ser muy variable, por lo que pueden agruparse en diferentes tipos y definir su terminología según la disposición de sus elementos. De esta forma existen estructuras tridimensionales planas, vigas espaciales, de curvatura simple y de curvatura doble. Las estructuras tridimensionales se pueden clasificar de manera genérica por su tipo de geometría en módulos rectangulares, cuadrados y triangulares; por su tipo de conexión en armaduras con conectores atornillados, esféricos atornillados, de cilindro atornillado y en ocasiones, soldados.

La figura 4 muestra la disposición simplificada de los conectores de las armaduras espaciales. Puede observarse que los conectores pueden disponerse de tal modo que las barras formarán bases rectangulares o cuadradas (tipo A) y triangulares (tipo B). Sin embargo, estas ordenaciones son idénticas si se prescinde del plano de referencia horizontal.

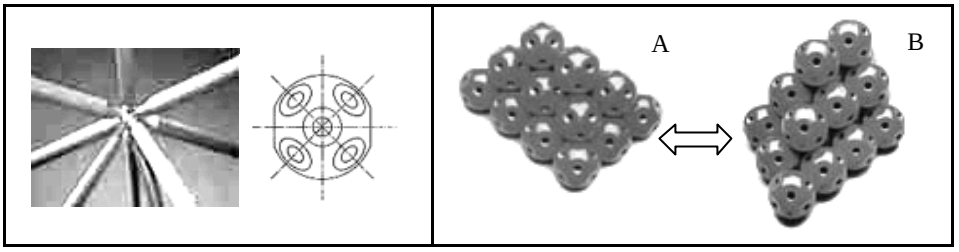


Figura 4 Retículas A) de base rectangular o cuadrada, B) de base triangular

El elemento base de la ordenación son seis esferas que estructuran una pirámide de base cuadrada unida a un tetraedro mostrado en la figura 5. Este módulo consigue compactar el espacio, aspecto que no consiguen ni la pirámide ni el tetraedro por si mismos y en realidad es un prisma triangular deformado. Si de forma progresiva se agregan esferas y barras que unan estas últimas en el interior del elemento base, se llega a un espacio infinito estructurado de tipo fractal en el que se consigue disminuir la masa e incrementar la rigidez. La concepción estructural a través del empleo de fractales es una técnica que ha sido ampliamente utilizada desde hace muchos años; Gustave Eiffel la empleó para estructurar su célebre torre.

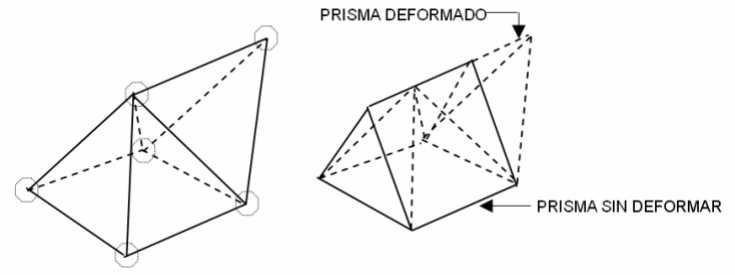


Figura 5 Elemento Base de la estructura tridimensional

Si el elemento base es deformado estirándolo respecto a una dirección o se mueve una capa, por ejemplo horizontal, o si se hacen girar los nudos respecto a un eje o a un centro o si se aplica cualquier otro movimiento posible o combinación de movimientos, se tendrá entonces un elemento base deformado, que es el que se aplica para generar cualquier forma concebible para una armadura espacial.

Las tipologías de estructuras que se mostraron en la figura 3 son derivadas de un elemento base. Una muestra son las estructuras de base cuadrada A y triangular B de la figura 4 las cuales son una materialización del elemento base en dos o más capas de esferas. Sin embargo, como se pudo constatar, la base para ambos casos es de cuatro nodos y puede ser no necesariamente cuadrada; podría tener la base rectangular, romboidal o cualquier deformación o reforma (tipo fractal). Por este hecho, la armadura espacial puede tener las formas más caprichosas, siendo la imaginación el único límite. Bastará con que el conjunto de elementos no introduzcan inestabilidad (que no se forme un mecanismo), que la diferencia de longitudes entre las barras no sea muy grande, que los ángulos entre barras no sean inferiores en lo posible a 40º y que la posición de los nodos en el espacio pueda establecerse preferentemente con algoritmos matemáticos. Todos estos aspectos son condiciones que una armadura debe necesariamente cumplir. Además, si la superficie de la armadura es plana, ésta deberá tener suficiente rigidez para controlar las flechas centrales así como la elevada fuerza lateral en la zona superior de los soportes y el punzonamiento en los apoyos; si es de simple o doble curvatura, se deberá prestar particular atención al desarrollo de esfuerzos en los bordes y/o al coceo en los

apoyos. Es importante destacar que en las armaduras tridimensionales cualquier daño local del reticulado difícilmente produce el colapso total de la estructura por la alta hiperstaticidad que éstas involucran.

En este trabajo se describen de forma detallada, los resultados de un programa destinado a evaluar el comportamiento estructural bajo cargas estáticas y dinámicas de cubiertas a base de armaduras tridimensionales tipo bóveda. Cuatro propuestas de armaduras tridimensionales de este tipo, con alturas de clave diferentes, son estudiadas para definir la configuración geométrica más adecuada del soporte estructural de una cubierta de gran claro para un edificio público. Así mismo, es explicada a detalle la metodología para la elaboración de los modelos así como el análisis estático y dinámico modal espectral de este tipo de armadura a través de programas comunes de análisis tridimensional en los que esta compleja forma estructural normalmente no es incluida en plantillas preelaboradas, ejemplos o librerías.

MODELADO DE ARMADURAS TRIDIMENSIONALES ABOVEDADAS

El presente trabajo muestra el procedimiento de elaboración y análisis estructural para un proyecto en el que se propone emplear una cubierta a base de armadura tridimensional abovedada. Se trata de un edificio ubicado en el Centro de Convenciones Siglo XXI, de la Ciudad de Mérida, Yucatán el cual formará parte del complejo de salas que en conjunto integran este centro y que será destinado a albergar las oficinas generales de la Secretaría de Turismo. Las figuras 6 y 7 muestran los planos arquitectónicos del ala poniente del complejo que se destinarán como salas en la planta baja y alta de este edificio, con una superficie de 22 x 50 m por planta.

Puesto que las oficinas son de carácter público, éstas se mantendrán ubicadas en el edificio sólo de manera temporal. Cabe señalar que las salas ubicadas en este complejo, están diseñadas con paneles deslizables que permiten controlar el tamaño de la sala, de acuerdo a las necesidades de los eventos que se realizan.

El proyecto original estaba estructurado a base armaduras planas de acero soportadas por pares de columnas, pero el requerimiento de superficie y distribución arquitectónica definidos en este proyecto hacían necesario el empleo de una estructura que mantuviera el área libre de obstáculos cuando los espacios se empleen como oficinas, o como salas con divisiones cuando se empleen para otro tipo de actividades. Por este motivo el proyecto original de la cubierta fue sustituido por una estructura tridimensional abovedada, pues este tipo de armadura se consideró el más adecuado para obtener espacios de gran amplitud, aunado a su rápido proceso constructivo, a su comportamiento estructural simple y a su espectacular diseño arquitectónico.

La figura 8 muestra una vista lateral del monótono proyecto original con armadura tridimensional plana y por otro lado, con armadura tridimensional abovedada en el que se puede observar el alto impacto visual que puede lograrse con este tipo de estructura espacial.

Este proyecto consta de tres propuestas diferentes: La primera propuesta corresponde a la estructura tridimensional plana horizontal original, que se constituyó en un punto de referencia y de partida hacia las siguientes dos propuestas de tipo abovedado. La segunda propuesta corresponde a una estructura tridimensional tipo bóveda de cañón de curvatura simple, modelo del que se derivaron tres variantes con diferentes radios de curvatura y alturas. En la tercera propuesta se elaboró una estructura tridimensional tipo bóveda vaída de curvatura doble, de manera tal que aunque se parte de una base rectangular de la planta del proyecto arquitectónico, en su parte más elevada la cubierta toma la forma de casquete. De esta configuración también se derivaron tres variantes con diferentes radios de curvatura y alturas.

Estas propuestas se propusieron con fines comparativos y para establecer la influencia que tiene la configuración geométrica en el comportamiento estructural de los elementos.

Se procedió a modelar la estructura inicial -a base de estructura tridimensional plana- directamente con el programa SAP2000, dibujándose el elemento base tridimensional y reproduciéndolo en bs dos planos horizontales hasta obtener la armadura deseada. Es importante resaltar que en este proceso debe tenerse

mucho cuidado en no emplear de manera indiscriminada las opciones editar, pegar-reproducir, a fin de no sobreponer dos elementos en un mis mo sitio.

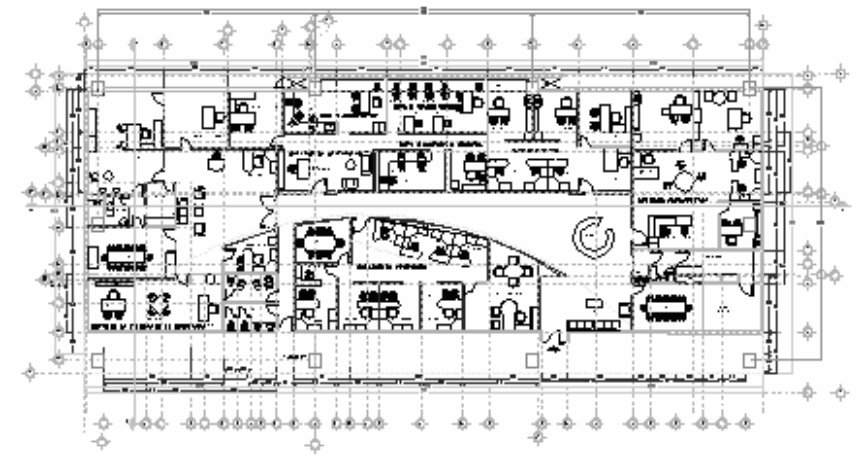


Figura 6 Planta arquitectónica (planta baja)

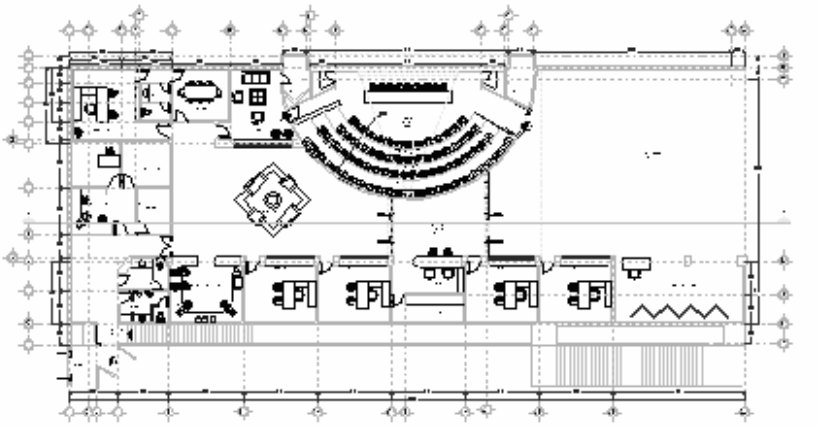


Figura 7 Planta arquitectónica (planta alta)

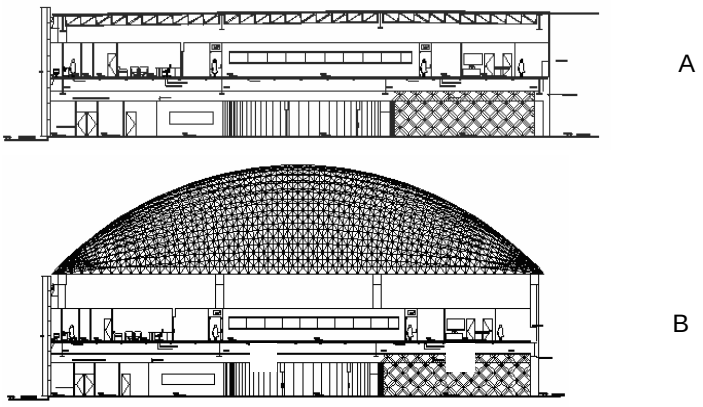


Figura 8 Vista lateral de Oficinas Generales, Secretaría de Turismo Mérida, Yucatán: A) Diseño original con armadura tridimensional plana, y B) Diseño con armadura abovedada

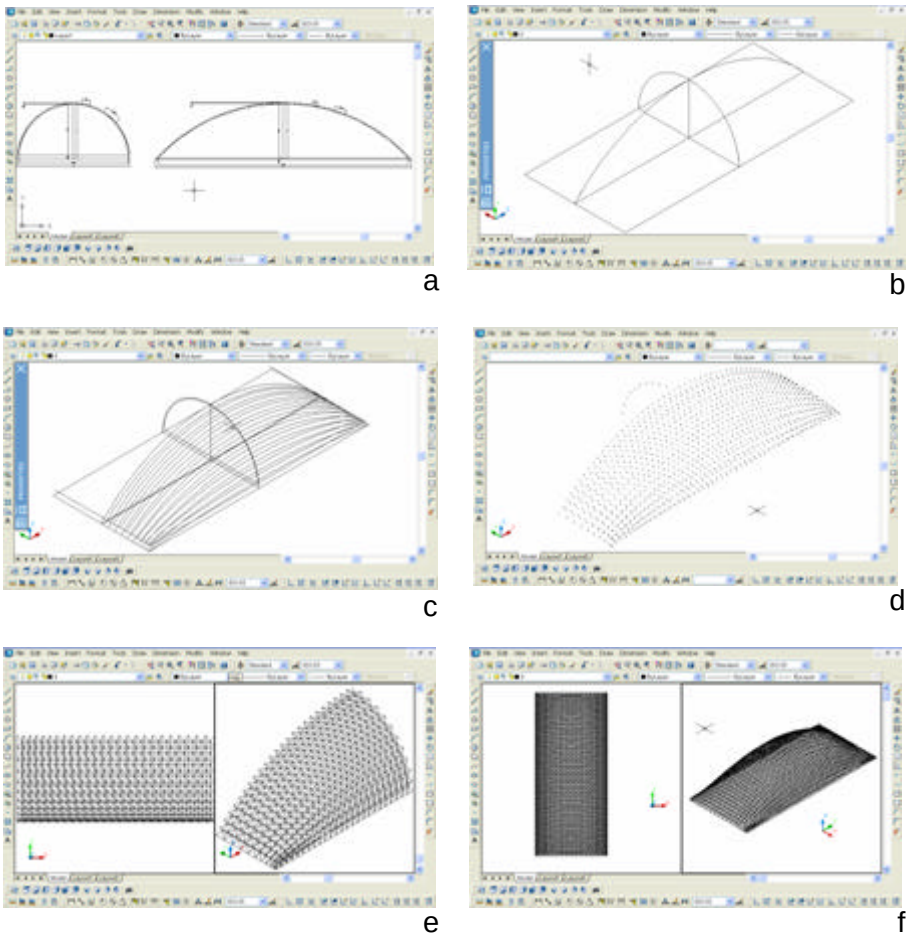
Al elaborar la segunda propuesta –con forma de bóveda de cañón-, se partió de una plana, con la idea de que los nodos sólo se tuvieran que trasladar verticalmente, pero se constató que la malla tridimensional resultante presentaba elementos con longitudes diferentes, aspecto inadecuado en este tipo de estructura, sobre todo si se tiene en consideración el proceso constructivo, el cual para ser eficiente necesita mantener aproximadamente idéntica la longitud de los elementos. De esta forma, se tuvo que idear una manera de mantener todos los elementos con una longitud similar de manera que permitieran obtener la configuración deseada. Se definieron alturas de 11, 3 y 7 m. La primera altura es idéntica a la longitud media del claro corto que se desea cubrir y es la que estructuralmente produciría un coceo nulo; la segunda altura corresponde a la que arquitectónicamente es ideal para generar esta estructura y la tercera corresponde a la longitud media entre 3 y 11 metros.

De esta manera y con la finalidad de facilitar la elaboración del modelo, con la ayuda del programa AutoCAD se procedió a dibujar un prisma de lados iguales y se trató de acomodar en el espacio de manera tal que permitiera elaborar la configuración con curvatura simple. Así, se determinó por ejemplo que para cubrir el claro corto de 22 m y 3 m de alto, se necesitarían elementos de 1.0488 m de longitud, la cual se tendría que mantener en los lados del prisma inicial, con una altura de 0.7415 m. Así, los elementos tendrían que ser rotados 2.77º, a un radio de 21.67 m, lo cual permitió obtener un arco que cumplía las expectativas deseadas: mantener elementos de una misma longitud y cubrir el claro de 22 m. El mismo procedimiento se aplicó para elaborar las configuraciones de 7 y 11 m. Dichos modelos, grabados con la extensión DXF fueron importados del AutoCAD al SAP2000 sin ningún problema.

Para elaborar la tercera propuesta geométrica –modelo de bóveda vaída de curvatura doble-, se presentó el problema de que los elementos se iban deformando en los dos sentidos, disminuyendo su longitud en la zona de los bordes de la armadura. Dada la experiencia al generar la geometría de los modelos anteriores, se ideó otra manera de generar los modelos geométricos de este tipo. Con base a pruebas se determinó un procedimiento que permitió generar las tres propuestas de manera tal, que aunque no mantienen una longitud idéntica todos los elementos de la armadura, éstos conservan longitudes constantes en secciones bien definidas de la estructura. Dicho procedimiento se condensa en los pasos que se describen a continuación:

1. Primeramente se definieron los arcos y su configuración geométrica de manera tal que se mantuvieran en la curvatura mayor los elementos a una misma longitud, tomando la curvatura mayor de base y manteniendo los lados del prisma base con una misma longitud en sus lados, de manera muy similar a la configuración semicilíndrica. La tabla 1a muestra dicho procedimiento.
2. Dibujando en tres dimensiones se procedió a trazar las curvas base -las de mayor radio, 11 m en el caso de la más alta-, y éstas se dividieron en segmentos iguales, quedando la pauta para elementos iguales en un sólo sentido, es decir, las longitudes de los elementos iguales en cada dirección, pero diferentes entre sí. Este procedimiento se ejemplifica en la tabla 1b.
3. Con las divisiones de las curvas base de mayor radio, se procedieron a trazar las curvas a lo largo del claro, tanto las de la malla superior como inferior. La tabla 1c muestra dichas divisiones.
4. La tabla 1d ilustra el paso siguiente, en el que se procedió a dividir estas curvas en segmentos iguales, marcando cada segmento con puntos, los cuales definen la posición de los nodos en el espacio.
5. Trabajando cada elemento según su sentido en capa diferente (layer) para mantener un control del dibujo, se procedió al trazo de cada elemento de punto a punto, es decir, de nodo a nodo.
6. Teniendo la estructura completa, se procedió a realizar una revisión del trazo de todos los elementos, desde cada uno de los ángulos de las vistas en tres dimensiones, con la finalidad de que los elementos trazados fuera de su punto nodal, pudieran ser corregidos en esta etapa.
7. Una vez que se generó y revisó la estructura completa, ésta fue integrada en una única capa a la que se le denominó FRAME conteniendo toda la información del modelo. Por facilidad y simplificación se aprovecharon las características de simetría de la estructura. La tabla 1e muestra sólo una cuarta parte de la estructura que fuera modelada finalmente de manera completa (tabla 1f) con el empleo de las funciones de reproducción automática MIRROR y ROTATE.
8. Obtenida la estructura, ésta fue grabada con la extensión DXF de AutoCAD, para posteriormente ser tratada con el programa de análisis estructural SAP2000.

Tabla 1 Pasos para obtener una armadura tridimensional abovedada empleando AUTOCAD®



ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural de las estructuras que se muestran en la tabla 2, modeladas preliminarmente con AutoCAD®, se realizó con el programa SAP2000. En todos los casos se emplearon perfiles tubulares redondos de acero estructural de 48.3 mm de diámetro y de 5 mm de espesor, con un módulo de 200,000 MPa ($20x10^6$ Ton/m^2). El edificio, a pesar de ser destinado para albergar oficinas, posee espacios para salas que concentrarán una gran aglomeración de personas, por este motivo, se clasificó dentro del grupo A.

Se realizaron los análisis por carga gravitacional, viento y modal espectral. En el caso del análisis estático, se consideró el peso propio distribuido de los elementos y adicionalmente los pesos que se anotan en la tabla 3, los cuales fueron incorporados como una masa adicional distribuida en los elementos tubulares a través de la modificación del peso volumétrico y de la densidad del acero.

Los resultados obtenidos con esta técnica son prácticamente iguales a los obtenidos al considerar los pesos adicionales actuando de manera concentrada en todos los nodos superiores o inferiores de las armaduras tridimensionales.

Tabla 2 Tipos de modelos elaborados con AutoCAD®

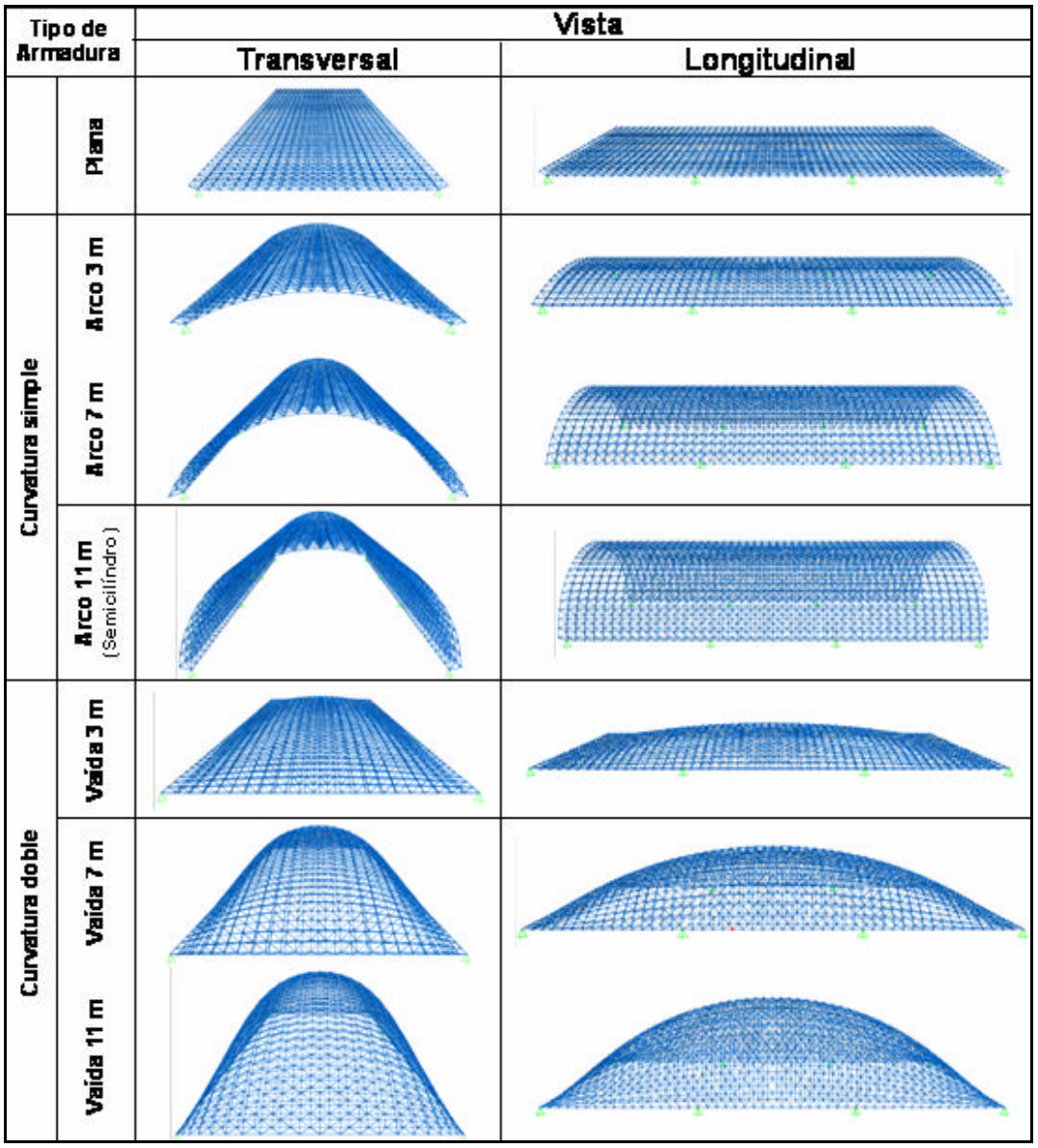


Tabla 3 Características de los modelos

Tipo de Estructura		Núm. elementos	Peso Propio (kN)	Peso adicional* (kN)	Peso Total (kN)
Plana		8800	468.9	920.0	1388.9
Simple Curvatura	3 m	8272	460.4	614.0	1074.4
	7 m	9568	535.7	725.2	1260.9
	11 m	12030	691.5	864.7	1556.2
Simple Curvatura	3 m	8800	459.8	625.0	1084.8
	7 m	8794	474.3	673.0	1147.3
	11 m	8800	487.7	720.0	1207.7

* Incluye instalaciones, cubierta a base de lámina de cobre 0.4 mm, aislante térmico y carga viva [686.7 y 196.2 Pa (70 y 20 Kg/m^2) para superficies planas y curvas respectivamente].

Para el caso del análisis dinámico modal espectral se empleó el espectro de diseño que se muestra en la figura 9 correspondiente a la zona A en suelo tipo I, con un coeficiente sísmico de 0.08. Así mismo, se consideró un factor de comportamiento sísmico Q = 2 y no se aplicaron factores correctivos debido a que las estructuras no son irregulares.

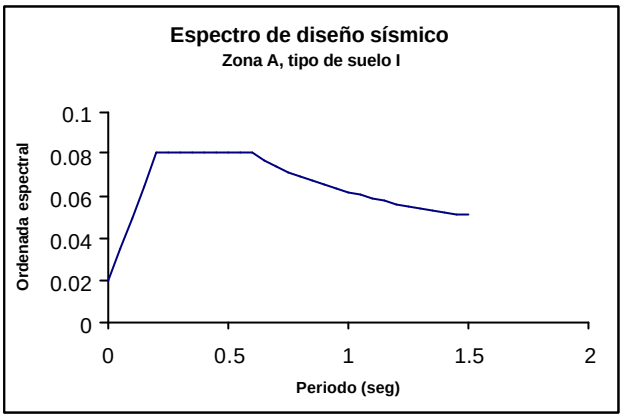


Figura 9 Espectro de diseño sísmico empleado

Por otro lado, para el caso del análisis por viento, se empleó el análisis estático considerando las ecuaciones siguientes, recomendadas en las NTC del RCDF para diseño por viento:

$$p = C_p\, C_z\, K\, P_o \qquad (1)$$

En esta fórmula se consideró que la estructura se encuentra ubicada en la zona C, que corresponde a una zona de terreno abierto con nula obstrucción al flujo del viento. C_p se tomó igual a -0.7 para la cubierta plana y para el caso de las cubiertas curvas, las relaciones a/b de la tabla de factores de presión para cubiertas de arco permitió tomar en todos los casos, un valor de C_p igual a -0.5. La presión básica de diseño P_o se consideró igual a 343.35 Pa (35 kg/m^2), aplicable a estructuras del grupo A. El factor correctivo K por condiciones de exposición se tomó igual a 1.6 y finalmente, el factor C_z se calculó con la expresión:

$$C_z = \left(\frac{Z}{10}\right)^{\frac{2}{a}} \qquad (2)$$

Donde Z es la altura del área expuesta sobre el nivel del terreno y *a* es un factor que en este caso se consideró igual a 7.0 (tomado de la sección 3.2 de las NTC-Viento).

La tabla 4 muestra las presiones de viento calculadas para cada uno de los siete casos. Cabe aclarar que por seguridad y simplificación, se consideró que en las estructuras vaídas (doble curvatura), el viento desarrolla exactamente la misma presión que en las estructuras de curvatura simple.

Tabla 4 Presiones de viento

Tipo de Estructura		Presiones de Viento
Plana		-282.23 Pa (-28.77 kg/m^2)
Simple Curvatura	3 m	-302.43 Pa (-30.83 kg/m^2)
	7 m	-324.90 Pa (-33.12 kg/m^2)
	11 m	-339.52 Pa (-34.61 kg/m^2)
Doble Curvatura	3 m	-302.43 Pa (-30.83 kg/m^2)
	7 m	-324.90 Pa (-33.12 kg/m^2)
	11 m	-339.52 Pa (-34.61 kg/m^2)

Definidos los diferentes tipos de cargas expuestos, se ejecutó el cálculo estructural realizando las combinaciones respectivas para identificar las situaciones más críticas.

RESULTADOS

Una vez realizado el cálculo estructural se obtuvieron los resultados siguientes. En la tabla 5 se muestran las deflexiones máximas, los períodos fundamentales de vibrar y las cargas axiales máximas determinadas en los elementos críticos de cada uno de los tipos de armaduras estudiadas.

Tabla 5 Resultados principales

Tipo de Estructura		Desplazamiento Vertical Máximo (mm)	Carga axial última (kN)	Período Fundamental (seg)
Plana		151.0	-371.0	0.55
Simple curvatura	3 m	13.0	-355.8	0.22
	7 m	6.6	-227.8	0.32
	11 m	9.0	-455.0	0.59
Doble curvatura	3 m	112.0	-367.0	0.42
	7 m	60.0	-242.0	0.34
	11 m	260.0	-182.2	0.79

Como era de esperarse, el efecto de las cargas sísmicas es prácticamente nulo debido a que el coeficiente sísmico empleado para la zona en la que se construirá esta estructura es muy bajo. Por el contrario, el efecto del viento es muy importante y rige en el diseño de manera conjunta con la carga gravitacional.

La tabla 5 muestra que los desplazamientos máximos se obtienen en los casos de la estructura plana y en las de doble curvatura de 3 y 11m. Ésta última rebasa por mucho la deflexión máxima permisible fijada para este caso en L/150. El período fundamental de la misma es también muy elevado (0.79 seg) e influye fuertemente en la obtención de grandes desplazamientos bajo la acción de cargas dinámicas por viento. La configuración de esta armadura no debe ser empleada a pesar de que desarrolla cargas axiales últimas bajas (de sólo 182.2 kN) ya que se pudo constatar que las deformaciones que puede presentar son excesivas.

La armadura vaída de 7 m logra reducir la deflexión a la mitad respecto a la de 3 m y a más de la cuarta parte de la que se obtiene con la armadura de 11 m. Esto da la pauta a inferir que las alturas de aproximadamente 1/3L de las armaduras abovedadas con base rectangular ofrecen los mejores comportamientos. L corresponde a la longitud del lado menor de la base rectangular de la armadura.

Puede apreciarse que las estructuras con cubierta curva de 7 metros (de simple y doble curvatura) presentan los comportamientos más adecuados debido a que son las que ofrecen mayor rigidez, además de que permiten desarrollar cargas axiales últimas menores y períodos de vibrar relativamente cortos. De estas dos opciones, la armadura de curvatura simple es la más óptima ya que adicionalmente es posible obtener la deflexión menor de todos los casos analizados, con sólo 6.6 mm en un claro de 22 metros. Esto reafirma el hecho de que la altura más apropiada para la cubierta tridimensional debe ser cercana a L/3 (7m). Por otro lado, es importante resaltar que la armadura más liviana y económica corresponde al caso de la armadura de curvatura simple de 3 m (1074.4 kN de peso total contra 1260.9 kN de la armadura de curvatura simple de 7m), pero desarrolla una carga axial última 56% mayor que la que presenta la armadura de curvatura simple de 7 m.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos del análisis efectuado al conjunto de estructuras, es posible señalar que las configuraciones de curvatura simple con una altura L/3 permiten optimizar el comportamiento estructural de la cubierta tridimensional abovedada que se pretende construir. L corresponde al lado menor en planta de la estructura.

Es importante recordar que los elementos más esforzados se encuentran situados en las zonas aledañas a los apoyos. Debe tenerse particular cuidado en el diseño de los elementos de esa zona, ya que se encuentran sometidos a altas cargas de compresión y deberá evitarse la inestabilidad por pandeo local de los elementos o la concentración excesiva de esfuerzos en las conexiones o en los nodos de unión, recomendándose inclusive si es necesario, el empleo de elementos tubulares con una sección más robusta (de sección transversal mayor o preferentemente macizos). Puede también incrementarse la sección transversal efectiva añadiendo placas soldadas a dichos elementos que permitan disminuir el riesgo inestabilidades.

Especial interés reviste la revisión del conjunto armadura-soportes. Los soportes pueden en este caso, ser columnas o muros combinados con columnas. En el presente cálculo se consideró a los soportes de tipo fijo con el objeto de simplificar los modelos y observar el comportamiento exclusivamente de la armadura tridimensional. Naturalmente, un estudio más elaborado debería de abarcar también el modelado de los soportes -a base de columnas combinadas con muros- que garanticen un comportamiento similar al propuesto en este estudio.

Por otro lado, debe remarcarse que el empleo combinado de los programas AutoCAD y SAP2000 permitió la elaboración de modelos relativamente complejos, los cuales hubiesen sido prácticamente imposibles de elaborar empleando únicamente las herramientas de modelado del SAP2000.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las compañías GEOMÉTRICA y CONSTRUCTALIA por la información proporcionada para la elaboración del presente artículo y un agradecimiento especial al CONACYT por el financiamiento del software con el que se realizaron los cálculos presentados.

REFERENCIAS

Adame Gerardo I., (1999), "**Elaboración de un programa interactivo para el análisis de armaduras con interfaz gráfica**". Tesis de Licenciatura, UAG. 145pp.

Cabildo Municipal, "**Reglamento de construcciones del municipio de Chilpancingo de los Bravo, Guerrero**" (1999), H. Ayuntamiento, Gaceta Municipal, 155pp.

DDF, "**Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo**", (1997), Berbera Editores, 277pp.

DDF, "**Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento**", (1997), Berbera Editores, 277pp.

Meli Piralla R. (2000), "**Diseño Estructural**". Ed. Limusa, 596pp.

McCormac J. (2000), "**Diseño de Estructuras de Acero, Método LRFD**". Ed. Alfaomega, 573pp.

Wilson, E. (2000), "**Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures**". Manual de Usuario SAP2000, Sección 12-10, CSI.

Sitios de Internet:
http:// www.geometrica.com/
http:// www.constructalia.com/